

ESTIMACIÓN DE BIOMASA ARBOREA POR MEDIO DE ÍNDICES DE VEGETACIÓN PARA EL PARQUE NACIONAL NATURAL LA PAYA.

ESTIMATE OF ARBOREAL BIOMASS THROUGH VEGETATION INDEX FOR NATIONAL NATURAL PARK LA PAYA.

Ingeniera Catastral y Geodesta:

Ángela Natalia Rodríguez Cortes



*Universidad Militar Nueva Granada- Especialización en Geomática
Bogotá D.C.*

ESTIMACIÓN DE BIOMASA ARBOREA POR MEDIO DE ÍNDICES DE VEGETACIÓN PARA EL PARQUE NACIONAL NATURAL LA PAYA.

ESTIMATE OF ARBOREAL BIOMASS THROUGH VEGETATION INDEX FOR NATIONAL NATURAL PARK LA PAYA.

Ángela Natalia Rodríguez Cortes

Ingeniera Catastral y Geodesta, Universidad Distrital “Francisco José de Caldas”,
Ingeniera Contratista Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Bogotá, Colombia.
ntlrodriguez15@gmail.com

RESUMEN

En este trabajo se estudia el potencial del índice diferenciados de vegetación (NDVI) de las Banda 4 y la Banda 5 del sensor OLI, del satélite Landsat 8 para estimar biomasa arbórea del Parque Nacional Natural “La Paya”, ubicado en el municipio de Leguizamo (Putumayo). Se aplican las correcciones radiométricas a la imagen digital utilizada para obtener magnitudes físicas de la superficie (reflectancia) y calcular los índices de vegetación; se realiza una clasificación de la cobertura dentro del área de estudio, por medio de la fotointerpretación de la imagen Landsat 8 del año 2015 y de información de la cobertura vegetal del año 2005 del parque, para discriminar las zonas de vegetación arbórea a las cuales se les va a determinar el valor de biomasa. Para la estimación de la biomasa arbórea, se aplicó un modelo de regresión que relaciona la biomasa de inventarios forestales hechos en la zona para cada cobertura vegetal y con los valores digitales (VD) de los NDVI. De los análisis de resultados, se concluye que es posible estimar razonablemente la biomasa de coberturas de vegetación arbolada con el uso de índices diferenciados de vegetación, para el Parque Nacional Natural La Paya, con los resultados obtenidos, se ha demostrado el potencial de las imágenes de satélite Landsat 8 y el índice diferenciado de vegetación (NDVI) para la gestión ambiental del sistema de Parque Nacional Naturales.

Palabras Clave: Biomasa, Índices de Vegetación, Imágenes Landsat 8, Clasificación de cobertura vegetal.

ABSTRACT

In this paper is studied the potential of differential vegetation index (NDVI) of Band 4 and Band 5 the OLI sensor, the satellite Landsat 8 for estimating arboreal biomass National Natural Park "La Paya" located in the municipality of Leguizamo (Putumayo). Radiometric corrections to the digital image used for the surface physics magnitudes (reflectance) and calculate the vegetation indices are applied. Then, cover classification is performed within the study area, through the photo interpretation of image Landsat 8 2015 and information of the vegetation cover in 2005 the park, to discriminate areas to which they are going to determine the value of biomass.

To estimate arboreal biomass, a regression model relating the biomass of forest inventory made in the area for each vegetation cover and the digital values (DV) of the NDVI was applied. From the analysis of results, we conclude that it is possible to reasonably estimate the biomass of vegetation cover using differential vegetation index for the National Park La Paya, with the results, it has demonstrated the potential of the images Landsat 8 and differential vegetation index (NDVI) for Environmental Management for the Natural National Park System.

Keywords: Biomass, Vegetation index, Images Landsat 8, Classification land cover.

INTRODUCCIÓN

El Parque Nacional Natural La Paya, creado a través de la resolución ejecutiva número 160 del 24 de agosto de 1984, se encuentra ubicado totalmente en el municipio de Leguízamo del departamento del Putumayo, de acuerdo al sistema de clasificación de Holdridge, la vegetación del parque corresponde a Bosque húmedo tropical, dentro del cual se encuentran bosques altos y bien desarrollados así como combinaciones de bosque bajo con sotobosque denso y bosque alto con poca presencia de palmas. (PNN. 2010).

La biomasa es un parámetro que caracteriza la capacidad de los ecosistemas para acumular materia orgánica a lo largo del tiempo y está compuesta por el peso de la materia orgánica aérea y subterránea que existe en un ecosistema forestal (*Schlegel et al. 2000*), esta se usa para cuantificar la cantidad de nutrientes en diferentes partes de las plantas y estratos de la vegetación, permite comparar distintos tipos de especies o vegetación o comparar especies y tipo de vegetación similares en diferentes sitios. La estimación de la biomasa es importante para varios tipos de estudios, entre ellos cabe destacar los inventarios de sumideros de CO₂, y la productividad primaria neta de la vegetación fotosintética (*Anaya et al. 2008*) Una alternativa para la estimación de la Biomasa es el uso de los sensores remotos, se puede realizar por medio de imágenes MODIS, con clasificación supervisada multiespectral, con datos LIDAR o a través de índices de vegetación.

En el presente trabajo se examina el potencial de los índices de vegetación para la estimación de biomasa, para así poder analizar y actualizar la información del Parque Nacional Natural La Paya y demostrar la utilidad de la Geomática en la gestión forestal, para cumplir este objetivo, se debe realizar el mapa de clasificaciones del uso y la cobertura del suelo del Parque Nacional Natural La Paya, analizar los resultados que ofrece el uso de índices de vegetación, para estimar la cantidad de biomasa arbórea para el Parque Nacional Natural La Paya, y finalmente, realizar el mapa de la cantidad de biomasa arbórea para el Parque Nacional Natural La Paya.

En Latinoamérica, se han venido desarrollando trabajos para estimar la biomasa aplicando la teledetección, en el año 1999, se desarrolló un estudio de métodos para la estimación de biomasa a través de datos LANDSAT TM en Jusnajib La Laguna, Chiapas, México. En este trabajo se evaluaron dos métodos para estimar biomasa con

apoyo en sensores remotos; el primer método se realizó con base en una clasificación supervisada multiespectral con seis bandas, se utilizaron tipos de vegetación identificados a partir de la composición de biomasa de los géneros dominantes y de la altura promedio estimada del dosel, habiéndose distinguido ocho clases de vegetación y en el segundo método se utilizaron índices diferenciados de vegetación (NDVI) de las bandas, se aplicó un modelo de regresión que relaciona la biomasa promedio con los valores digitales (VD) de los NDVI, el modelo exponencial fue el de mejor ajuste para el NDVI. Este estudio se concluye que es posible asociar razonablemente la biomasa de vegetación arbolada de pinoencino y reservorios de carbono con los índices de con los índices de vegetación. (*Calderón et al.1999*). En el 2007, se realizó un proyecto para evaluar la utilidad de imágenes LANDSAT 7 ETM+ de diferentes fechas para la estimación de biomasa aérea en bosques subtropicales secos de Argentina.(*Gasparri. 2007*) Primero se realizó un análisis temporal de datos espectrales para mejorar notablemente la capacidad para discriminar la vegetación en la región, el preprocesamiento de las imágenes comprendió la georreferenciación y el cálculo de reflectancia en superficie utilizando la corrección atmosférica de Rayleigh. Luego, se calcularon los siguientes índices de vegetación: Índice de Vegetación Normalizado (NDVI) e Índice de Vegetación Ajustado al Suelo (SAVI). Por último, se realizó una correlación de los datos de biomasa aérea con los valores espectrales de las diferentes bandas y con los valores de los índices de vegetación calculados para todas las fechas analizadas. El análisis de las correlaciones obtenidas permitirá identificar la mejor fecha para estimar biomasa aérea en la zona de estudio a partir del desarrollo de modelos empíricos, los cuales son importantes para relacionar variables biofísicas medidas a campo con datos provenientes de sensores remotos (*Cohen et al. 2003*).

Para el caso Colombiano, en el año 2008, se propone un método para aumentar el nivel de detalle en estimaciones regionales de biomasa aérea basado en productos MODIS y mediciones de biomasa aérea en campo, la vegetación se clasificó en pastizales, bosques secundarios y bosques primarios y se utilizó como variable explicativa de biomasa en bosques primarios y bosques secundarios la proporción de arbolado por píxel de MOD44 (VCF) siguiendo una relación exponencial. Los bosques secundarios tienen una dificultad adicional al no poder separarse de los bosques primarios con el producto MOD44 (VCF) y presentar valores de biomasa muy inferiores, por lo que se utilizaron mapas auxiliares de vegetación. Los intervalos de confianza de la regresión exponencial aumentan al aumentar la biomasa por tanto la incertidumbre es muy alta para la biomasa total: entre 3,473 y 23,693 millones de toneladas con una media de 16,467, sin embargo la diferencia de los resultados con estudios previos es mínima. (*Anaya et al. 2008*).

El estudio de la Geomática tiene por objetivo analizar, obtener y manejar información geográfica para aplicarla en procesos de toma de decisiones en diferentes campos (*UMNG.2005*), por esta razón esta especialización proporciona los elementos necesarios para poder realizar la estimación de biomasa arbórea por medio de índices de vegetación para el Parque Nacional Natural La Paya. Las áreas protegidas del

Sistema de Parques Nacionales Naturales de Colombia acogen ecosistemas que son estratégicos para el país por los bienes y servicios ambientales e inmateriales que ofrecen como la conservación del recurso hídrico, los glaciares, grandes extensiones de páramos, así como los bosques húmedos tropicales y andinos que son de vital importancia para el sostenimiento del ciclo de lluvias; el parque nacional natural la paya, es un área protegida del bosque amazónico, el cual funciona como regulador del clima mundial al evaporar y reciclar sus propias lluvias, bombeando millones de toneladas de agua del ciclo hídrico. Igualmente, contribuye en la fijación de carbono, manteniendo la estabilidad de la temperatura ambiental. (PNN.2010). Para realizar la estimación de cantidades de Biomasa y carbono almacenado para las áreas de bosque natural en el sistema de Parques Nacionales Naturales de Colombia, se utilizó el trabajo realizado por el Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM titulado “Estimación de las reservas potenciales de carbono almacenado en la biomasa aérea en bosques naturales en Colombia” (IDEAM, 2010), es decir que no se ha hecho un estudio detallado para los parques nacionales de la biomasa arbórea contenida en ellos, es por esto que es importante adelantar una investigación con respecto a la biomasa, por medio de la teledetección, la cual proporciona información sobre biomasa, volumen y otros parámetros biofísicos de las masas forestales por medio de los índices de vegetación, se ha demostrado su utilidad en la cuantificación del carbono almacenado en los bosques, en un amplio rango de escalas espaciales y ambientes.(Sevillano.2009).

1 MATERIALES Y MÉTODOS

1.1 ANTECEDENTES DE LA ESTIMACION DE BIOMASA

La determinación el contenido de biomasa y carbono potencialmente almacenado en los bosques de Colombia, fue un trabajo realizado por el Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM titulado “Estimación de las reservas potenciales de carbono almacenado en la biomasa aérea en bosques naturales en Colombia” (IDEAM, 2010), como parte del proyecto “capacidad Institucional Técnica y Científica para apoyar proyectos de Reducción de Emisiones por Deforestación REDD en Colombia”.

Los datos que se emplearon provienen de 2.791 levantamientos florísticos e inventarios forestales realizados en parcelas de diferente tamaño, que equivale a un área muestreada de 703 ha, la estratificación de los bosques naturales del país se realizó empleando el sistema de clasificación por zonas de vida propuesto por Holdridge y adaptado para Colombia por IDEAM (2005), de las cuales se generaron 16 tipos de bosques naturales. Para la estimación de biomasa se utilizaron modelos alométricos construidos propiamente para Colombia (Álvarez et al. 2010), el resultado del bosque húmedo tropical, que es el tipo de bosque encontrado en el PNN La Paya, se muestran en la tabla No.1:

TIPO DE BOSQUE	ECUACIÓN ALOMÉTRICA
<i>Húmedo tropical</i>	$\exp(2,82874+(-1,59605*\ln(D))+(1,23665*\ln(D)^2)+(-0,12606*\ln(D)^3)+(0,44123*\ln(Dens.)))$

Tabla No. 1 Ecuaciones alométricas desarrolladas por Álvarez et al. 2010.

Con base a este trabajo, se realiza la estimación de cantidades de Biomasa y carbono almacenado para las áreas de bosque natural en el sistema de Parques Nacionales Naturales de Colombia. El proceso consistió en realizar el corte espacial de la capa geográfica entregada por el IDEAM en donde relaciona el contenido de biomasa promedio por hectárea para cada tipo de bosque, con la capa de límites de parques y su posterior consolidación de estadísticas para cada parque. En la tabla No. 2 se muestra el tipo de Bosque, según la clasificación de Holdridge, para los bosques amazónicos y promedio de Biomasa aérea por Ha en el Sistema de Parques Nacionales.

TIPO DE BOSQUE	BOSQUE	BIOMASA (T/HA)	BIOMASA (TON)	AREA (HAS)	%
<i>bh-T</i>	Húmedo Tropical	260,88	1.966.305.117,23	7.537.286,58	79,71

Tabla No. 2: Tipos de Bosque y Biomasa aérea por Ha en el Sistema de Parques Nacionales por Corredor. 2011.

En la tabla No. 3 se especifica la cantidad en toneladas de biomasa aérea y la cantidad de carbono potencialmente almacenado para el Parque Nacional Natural La Paya.

PARQUE NACIONAL NATURAL	AREA (Ha)	BIOMASA (TON)	CARBONO (TON)
PNN LA PAYA	442.441,05	115309758,9	57654879,47

Tabla No. 3: Estimación de Biomasa y Carbono almacenado en el PNN La Paya por Corredor. 2011.

1.2 BIOMASA

La biomasa es la cantidad de materia que existe en un determinado ecosistema por unidad de superficie o de volumen, este parámetro forestal puede emplearse para estimar las cantidades potenciales de diversos productos y combustibles y para determinar la eficiencia de un rodal forestal, para comprender el funcionamiento y relaciones del ecosistema forestal con la productividad del sitio ya que refleja la distribución del material orgánico y permite evaluar los efectos de una intervención de carácter antrópico (Álvarez et al. 2005). Existen dos métodos comúnmente usados para estimar la biomasa: el método directo en el cual se corta el árbol y se determina

la directamente cada componente, y el indirecto que utiliza cubicación y ecuaciones o modelos basados en análisis de regresión que utiliza variables de campo como el diámetro a la altura del pecho (d), la altura comercial (hc) y total (ht), el crecimiento diamétrico, el área basal y la densidad específica de la madera (López.2013). Otro método indirecto es calcular magnitudes biofísicas de la vegetación por medio de la herramienta de la percepción remota o teledetección.

1.3 ÍNDICE DE VEGETACIÓN

Los índices de vegetación son medidas cuantitativas, basadas en los valores digitales, que tienden a medir la biomasa o vigor vegetal. Usualmente el índice de vegetación es producto de varios valores espectrales que son sumados, divididos, o multiplicados en una forma diseñada para producir un simple valor que indique la cantidad o vigor de vegetación dentro de un píxel. Altos valores de índices de vegetación identifican píxeles cubiertos por proporciones substanciales de vegetación saludable (Campbell. 2011).

Existe una variedad de Índices de Vegetación que han sido desarrollados para ayudar en el monitoreo de la vegetación. La mayoría de estos índices están basados en las interacciones diferentes entre la vegetación y la energía electromagnética de las bandas del espectro rojo e infrarrojo (Chuvieco.1990).

El Índice utilizado para estimar la biomasa es El NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), ya que este es utilizado para la discriminación de cubiertas vegetales y la actividad fotosintética de las plantas. Su cálculo se basa en la comparación de la cantidad de luz reflejada en el visible rojo y el infrarrojo cercano para una zona en particular de estudio.

$$NDVI = \frac{(IRC - R)}{(IRC + R)}$$

Ecuacion No. 1: Índice de Vegetación NDVI

Donde IRC es la reflectividad en el infrarrojo cercano y R es la reflectividad en el rojo. El rango de valores de las reflexiones espectrales se encuentra entre el 0 y el 1; ya que, tanto la reflectividad del infrarrojo cercano como la del rojo, son cocientes de la radiación reflejada sobre la radiación entrante en cada banda espectral. El valor del NVDI puede variar en función del uso del suelo, estación fenológica, situación hídrica del territorio y ambiente climático de la zona.

1.4 LOCALIZACION Y DESCRIPCION GENERAL DEL AREA DE ESTUDIO

El Parque Nacional Natural La Paya, se encuentra localizado en el departamento del Putumayo, municipio de Leguízamo, al sur de Colombia, en los límites con Ecuador y Perú. Fue declarado parque natural mediante el Acuerdo 015 de abril 25 de 1984, y aprobado mediante la resolución ejecutiva N° 160 del 24 de agosto de 1984 (PNN. 2010). Este parque tiene una inmensa extensión de selvas, varzeas e intrincados ríos

que albergan grandes cantidades de especies tanto de flora como de fauna y es el lugar de habitación de más de diez grupos indígenas. El parque cuenta con una extensión de 422.000 hectáreas, sus bosques se extienden a lo largo de un amplio trayecto de los ríos Caquetá por el norte y Putumayo al sur, dos de las principales vías de comunicación de esta región del país.

Con base en los estudios que se han realizado hasta el 2001, se han identificado 6.500 especies para la Amazonía Colombiana (IDEAM, SINCHI, IAvH, INVEMAR, 2001). La vegetación del Parque Nacional Natural La Paya es propia de la Amazonía, corresponde a Bosque húmedo tropical (BhT).

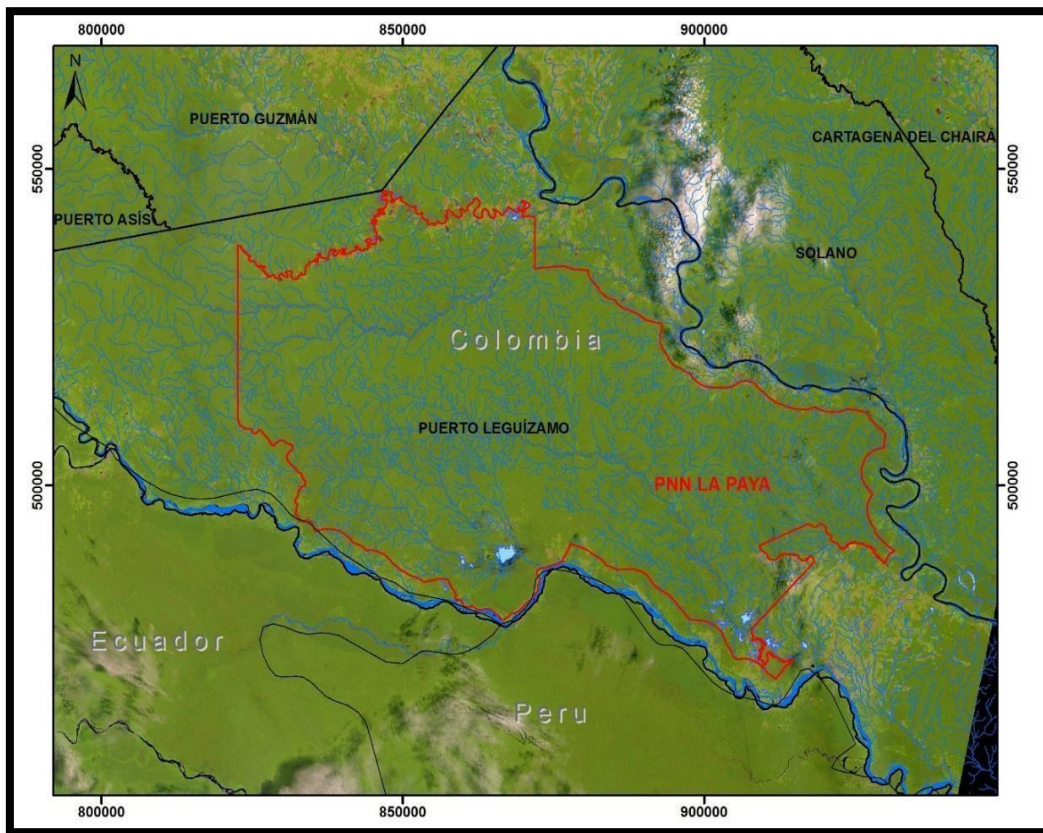


Figura No. 1: Localización PNN La Paya

En el Parque se identifican varios tipos de bosque: primarios intervenidos, secundarios tempranos y los bosques de varzea que se inundan periódicamente en el año. Los bosques primarios (poco intervenidos y muy intervenidos), los cuales representan al bosque natural, se caracteriza por su alta heterogeneidad; los bosques secundarios se han generado a partir de intervenciones antrópicas del bosque natural y se caracterizan por ser ecosistemas muy simples, homogéneos, las especies de mayor peso corresponden a los géneros *Vismia*, *Cecropia* y *Miconia*, aunque cuando la sucesión avanza se puede encontrar *Couratari* y *Virola*; y por último, el bosque de varzea es un

ecosistema especial, debido al régimen de inundación que lo caracteriza, dentro de los bosques secundarios y de varzea se encuentran especies aún en estado extractivo y su potencial de uso futuro es promisorio a nivel alimenticio, entre éstas están, el cacao (*Theobroma grandiflorum*), el palmito (*Euterpe oleracea*), la uva caimaron (*Maclenia rupestris*), la macoubea (*Macouvea guianensis*), el icaco (*Chrysobalanus icaco*), la platonía (*Platonia insignes*), el noll (*Elaeis oleifera*) y el arazá (*Eugenia stipitata*) especies maderables como el cedro (*Cedrela sp.*) y el granadillo (*Platymiscium sculatum*) (Cortina, 1997).

1.5 MATERIALES

Para estimar la biomasa del PNN la paya a través de índices de vegetación se utilizará una imagen satelital suministrada por la USGS del sensor **LANDSAT 8** del 21 de febrero de 2015, este satélite tiene una carga útil de dos sensores, y OLI (Operational Land Imager) y TIRS (Thermal Infrared Sensor) Respectivamente, estos dos instrumentos recogerán datos de imagen durante nueve bandas de onda corta y dos bandas térmicas de onda larga, esta imagen cuenta con 11 bandas. Los datos principales de resolución espectral y espacial de cada una de las bandas de la imagen se muestran en la tabla No. 4:

BANDAS	LONG. DE ONDA (µm)	R.ESPACIAL(m)
Banda 1 - Aerosol costero	0,43 - 0,45	30 30
Banda 2 - Azul	0,45 - 0,51	
Banda 3 - Verde	0,53 - 0,59	30
Banda 4 - Rojo	0,64 - 0,67	30
Banda5 – Infrarrojo cercano (NIR)	0,85 - 0,88	30
Banda 6 - SWIR 1	1,57 - 1,65	30
Banda 7 - SWIR 2	2,11 - 2,29	30
Banda 8 - Pancromático	0,50 - 0,68	15
Banda 9 - Cirrus	1,36 - 1,38	30
Banda 10 – Infrarrojo térmico (TIRS) 1	10,60 - 11,19	100
Banda 11 - Infrarrojo térmico (TIRS) 2	11,50 - 12,51	100

Tabla No. 4: Resoluciones del programa Landsat 8

Adicionalmente se recopiló información relevante como lo es el modelo digital de terreno, la información sobre cobertura vegetal dentro del parque y cartografía básica escala 1:100.000 que suministra el instituto geográfico Agustín Codazzi (IGAC) Y finalmente los documentos correspondientes al Plan de Manejo del Parque Nacional Natural La Paya, y estudios de estimación de Biomasa entregados por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM).

Para el procesamiento digital de la imagen, realizar la clasificación de la cobertura vegetal del PPN La Paya y obtener el índice de vegetación se utilizará el Software ERDAS IMAGINE. Este software, incorpora las funciones de procesamiento digital de imágenes y de SIG, estas funciones incluyen importación, visualización, transformación y análisis de datos ráster y vectoriales. (ERDAS.2006). Para la realización de salidas gráficas, se utilizara el software ARGIS. Este software es producido y comercializado por ESRI, en el campo de los Sistemas de Información Geográfica o SIG, se agrupan varias aplicaciones para la captura, edición, análisis, tratamiento, diseño, publicación e impresión de información geográfica.

1.6 METODOLOGÍA PROPUESTA

A continuación se presenta el diagrama que se siguió para la estimación de biomasa arbórea por medio de índices diferenciados de vegetación para El Parque Nacional Natural La Paya.

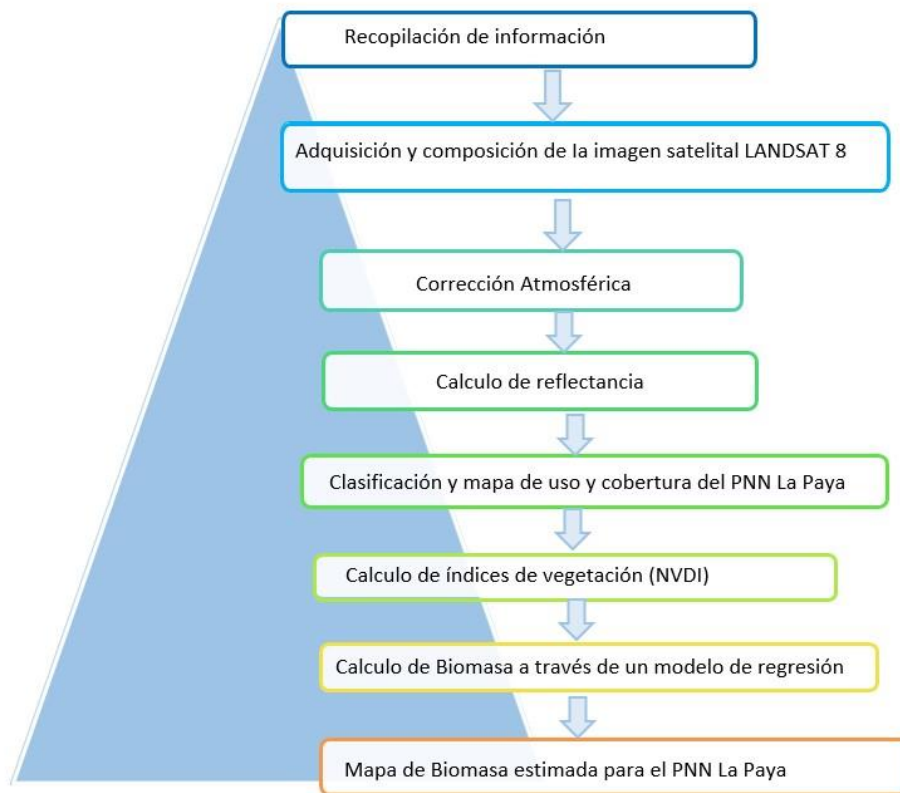


Figura No.2. Metodología Propuesta.

En primera instancia, se recopilo la información pertinente como los inventarios forestales de biomasa de la zona de estudio, adquirido de la metodología para estimar cambios en biomasa área boscosa y su relación con la emisión y captura de dióxido de carbono usando SIG: estudio de caso bosques de la ecorregión de la serranía de San Lucas. (Cardona Et Al. 2001). El procesamiento digital que se le aplicara a la

imagen LANDSAT 8, corresponde a las correcciones radiométricas con el fin de generar información útil sobre el área de estudio y poder generar las coberturas vegetales y los índices diferenciados de vegetación para el PNN La Paya. Para la estimación de la biomasa, se aplicará un modelo de regresión (método de ordenamiento exponencial), finalmente se realizara un mapa final de la biomasa arbórea para el Parque Nacional Natural La Paya.

2 RESULTADOS Y ANÁLISIS

Los productos estándar Landsat 8 LDCM, suministrados por el USGS, consisten en una serie cuantificada, calibrada y escalada de niveles digitales ND, los cuales representan los datos de una imagen multispectral adquirida por ambos sensores: OLI Operational Land Imagen y el TIRS Thermal Infrared Sensor (Ariza. 2013). El procesamiento digital de imágenes satelitales, es el conjunto de métodos y técnicas utilizados para mejorar la imagen digital y extraer información de las imágenes de satélite, para utilizarla en el análisis e interpretación del medio geográfico.

2.1 *Corrección Atmosférica*

El primer paso en el procesamiento digital de las imágenes, se aplica a la reducción del efecto atmosférico, este tipo de corrección radiométrica, es especialmente importante en las bandas de longitudes de onda cortas, debido a que estas son muy afectadas por la bruma atmosférica. Para la imagen Landsat, esta corrección, se realizó mediante un algoritmo denominado *ATCOR*, este algoritmo utiliza modelos de transferencia radiativa que permite conocer de una manera exacta la influencia de la atmosfera y los procesos de absorción y dispersión espectral. Para el proceso de corrección atmosférica para la imagen Landsat 8, se debe tener los metadatos de la imagen, y el modelo digital de terreno del área de estudio. Las correcciones que se deben realizar sobre las imágenes tienden a eliminar los ruidos causados a la señal que llega al satélite luego de haber atravesado la atmósfera.

2.2 *Calculo de reflectancia*

La señal recibida por los sensores se codifica en los diferentes valores de ND de acuerdo a la reflexión de la radiación electromagnética de las cubiertas. El proceso inverso, conversión de los ND a reflectividades, se realiza en dos fases: Primero pasar ND a valores de radiancia, a partir de los coeficientes de calibración, por medio de la ecuación No. 2:

$$L_{\lambda} = M_L Q_{cal} + A_L \quad \text{Ecuacion No. 2: Radiancia}$$

Donde:

L_{λ} = Es el valor de radiancia espectral medida en valores de (Watts /m² * srad * μm)

M_L = Es el factor multiplicativo de escalado específico obtenido del metadato

A_L = Es el factor aditivo de escalado específico obtenido del metadato

Q_{cal} =Producto estándar cuantificado y calibrado por valores de pixel (DN). Este valor se refiere a cada una de las bandas de la imagen.

El segundo paso corresponde a estimar los valores de reflectividad aparente, ya que la información en los ND se encuentra en modo relativo, es decir que a mayor ND mayor reflectividad, pero no es adecuada para comparar bandas, por el contrario, la reflectividad es una variable cuyos valores son comparables para distintos lugares y distintas fechas, esto hace más sólida la interpretación de los datos y el análisis integrado entre imágenes de distintos sensores.

$$\rho_{\lambda} = (M_p Q_{cal} + A_p) / \sin(\theta_{se}) \quad \text{Ecuación No. 3 : Reflectancia}$$

Donde:

ρ_{λ} =Es el valor de reflectancia planetaria, con corrección por ángulo solar.

M_p =Es el factor multiplicativo de escalado específico por banda.

A_p =Es el factor aditivo de escalado específico por banda.

$\sin(\theta_{se})$ =Es el ángulo de elevación solar. El ángulo de elevación solar del centro de la escena es provisto en el metadato de la imagen.

Q_{cal} =Es el producto estándar cuantificado y calibrado para valores de pixel (DN). Este valor se refiere a cada una de las bandas de la imagen.

A continuación, en la tabla No. 5, se muestra las operaciones echas para cada una de las bandas de la imagen landsat 8 del sensor OLI:

BANDAS	RADIANCIA	REFLECTANCIA
<i>Banda 1</i>	$L_{\lambda} = (1.2836E - 02 * \text{banda1}) - 64.18248$	$\rho_{\lambda} = ((2.0E - 05 * \text{banda1}) - 0.10) / \sin(58.03623849)$
<i>Banda 2</i>	$L_{\lambda} = (1.3145E - 02 * \text{banda2}) - 65.72365$	$\rho_{\lambda} = ((2.0E - 05 * \text{banda2}) - 0.10) / \sin(58.03623849)$
<i>Banda 3</i>	$L_{\lambda} = (1.2113E - 02 * \text{banda3}) - 60.56378$	$\rho_{\lambda} = ((2.0E - 05 * \text{banda3}) - 0.10) / \sin(58.03623849)$
<i>Banda 4</i>	$L_{\lambda} = (1.0214E - 02 * \text{banda4}) - 51.07079$	$\rho_{\lambda} = ((2.0E - 05 * \text{banda4}) - 0.10) / \sin(58.03623849)$
<i>Banda 5</i>	$L_{\lambda} = (6.2506E - 03 * \text{banda5}) - 31.25278$	$\rho_{\lambda} = ((2.0E - 05 * \text{banda5}) - 0.10) / \sin(58.03623849)$
<i>Banda 6</i>	$L_{\lambda} = (1.5545E - 03 * \text{banda6}) - 7.77228$	$\rho_{\lambda} = ((2.0E - 05 * \text{banda6}) - 0.10) / \sin(58.03623849)$
<i>Banda 7</i>	$L_{\lambda} = (5.2393E - 04 * \text{banda7}) - 2.61967$	$\rho_{\lambda} = ((2.0E - 05 * \text{banda7}) - 0.10) / \sin(58.03623849)$
<i>Banda 8</i>	$L_{\lambda} = (1.1560E - 02 * \text{banda8}) - 57.79808$	$\rho_{\lambda} = ((2.0E - 05 * \text{banda8}) - 0.10) / \sin(58.03623849)$
<i>Banda 9</i>	$L_{\lambda} = (2.4429E - 03 * \text{banda9}) - 12.21429$	$\rho_{\lambda} = ((2.0E - 05 * \text{banda9}) - 0.10) / \sin(58.03623849)$

Tabla No. 5: Ecuaciones para la radiancia y reflectancia de la Imagen Landsat8.

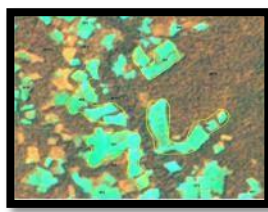
De acuerdo al análisis visual y el análisis estadístico por cada banda y su respectiva reflectancia aparente de la imagen Landsat 8, se evidencia que la corrección radiometría es un conjunto de procesos que busca disminuir los errores visuales de una banda mediante conversiones en este caso pasando de los ND originales en valores próximos de reflectancia aparente, es decir, reescala los ND originales que variaban dependiendo de la banda entre 0 y 255 convirtiéndolos a ND que indican la

reflectancia aparente que indica la relación existente entre la energía incidente y la reflejada que varían dependiendo de la banda. Las bandas resultantes, fueron utilizadas para optimizar la visualización de las categorías temáticas a discriminar en la clasificación de las coberturas dentro del Parque Natural Nacional La Paya.

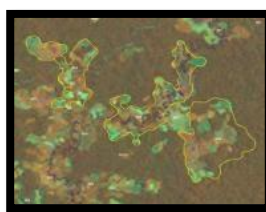
2.3 ***Clasificación de cobertura del PNN La Paya***

El proceso de clasificación tiene como objetivo, delimitar e identificar los diferentes objetos correspondientes a la cobertura de la tierra, con base en sus características espectrales. Para la clasificación de la cobertura vegetal dentro de Parque Natural Nacional La Paya, se utilizó el sistema de clasificación Corine Land Cover, el cual es el proyecto de cobertura de la tierra desarrollado dentro del programa CORINE (Coordination of Information on the Environment) promovido por la Comisión de la Comunidad Europea, que definió una metodología específica para realizar el inventario de la cobertura de la tierra. El proceso de clasificación de cobertura se realizó por medio de la fotointerpretación de la imagen Landsat 8 e información de la cobertura vegetal para el año 2005 suministrada por Parques Nacionales Naturales. Se tuvo en cuenta características de la vegetación tales como su contorno, textura y respuesta espectral, por cada tipo de cobertura vegetal, lo cual permitió definir y conocer en forma detallada el límite de cada una de las clasificaciones. Las 12 unidades de coberturas de la tierra de acuerdo con la metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia encontradas dentro del PNN La Paya se muestran a continuación:

Pastos limpios (2.3.1): Esta cobertura comprende las tierras ocupadas por pastos limpios, la realización de prácticas de manejo (limpieza, encalamiento y/o fertilización, etc.) y el nivel tecnológico utilizados impiden la presencia o el desarrollo de otras coberturas.



Mosaico de pastos con espacios naturales (2.4.4): Constituida por las superficies ocupadas principalmente por coberturas de pastos en combinación con espacios naturales.

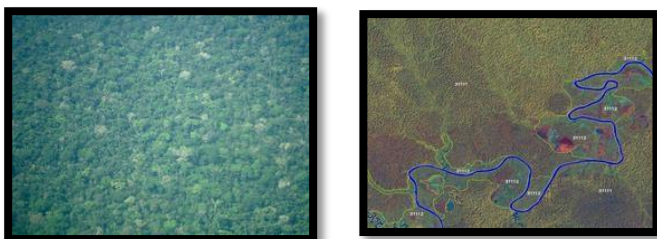


Mosaico de cultivos y espacios naturales (2.4.5): Corresponde a las superficies ocupadas principalmente por cultivos en combinación con espacios naturales, donde

el tamaño de las parcelas es muy pequeño y el patrón de distribución de los lotes es demasiado intrincado para representarlos cartográficamente de manera individual.



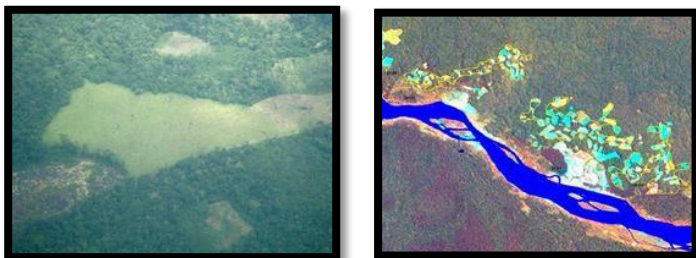
Bosque denso alto de tierra firme (3.1.1.1.1): Corresponde a las áreas con vegetación de tipo arbóreo caracterizada por un estrato más o menos continuo, con altura del dosel superior a 15 metros y que se encuentra localizada en zonas que no presentan procesos de inundación periódicos.



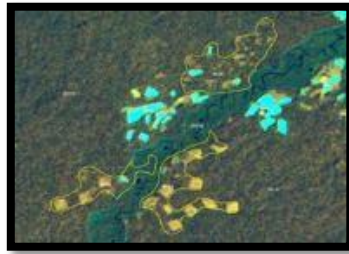
Bosque denso alto inundable (3.1.1.1.2): Corresponde a las áreas con vegetación de tipo arbóreo caracterizada por un estrato más o menos continuo, con altura del dosel superior a 15 metros y que se encuentra localizada en las franjas adyacentes a los cuerpos de agua (lóticos).



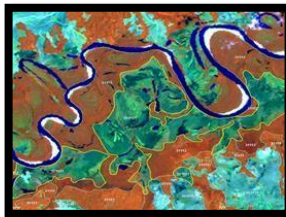
Bosque fragmentado con pastos y cultivos (3.1.3.1): Comprende los territorios cubiertos por bosques naturales donde se ha presentado intervención humana de tal manera que el bosque mantiene su estructura original.



Bosque fragmentado con vegetación secundaria (3.1.3.2): Comprende los territorios cubiertos por bosques naturales donde se presentó intervención humana y recuperación del bosque, de tal manera que el bosque mantiene su estructura original. Las áreas de intervención están representadas en zonas de vegetación secundaria, las cuales se observan como parches de variadas formas que se distribuyen de forma irregular en la matriz de bosque.



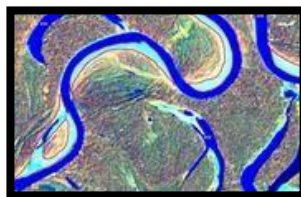
Herbazal denso inundable (3.2.1.1.2): Corresponde a una cobertura natural constituida por un herbazal denso, el cual se desarrolla en áreas que están sujetas a períodos de inundaciones, las cuales pueden presentar o no elementos arbóreos y/o arbustivos dispersos.



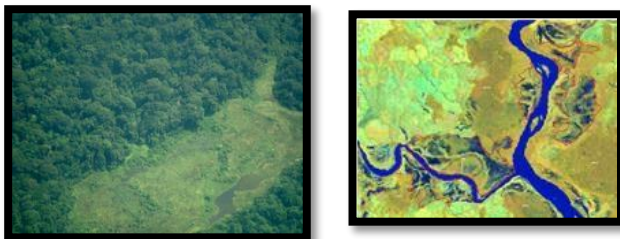
Vegetación secundaria o en transición (3.2.3): Comprende aquella cobertura vegetal originada por el proceso de sucesión de la vegetación natural que se presenta luego de la intervención o por la destrucción de la vegetación primaria, que puede encontrarse en recuperación tendiendo al estado original.



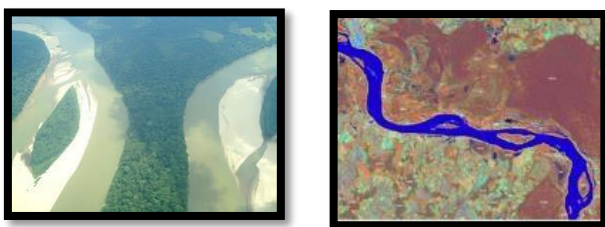
Zonas arenosas naturales (3.3.1): Son terrenos bajos y planos constituidos principalmente por suelos arenosos, se encuentran conformando por playas de ríos, bancos de arena de los ríos.



Zonas pantanosas (4.1.1): Esta cobertura comprende las tierras bajas, que generalmente permanecen inundadas durante la mayor parte del año, pueden estar constituidas por zonas de divagación de cursos de agua, llanuras de inundación, antiguas vegas de divagación y depresiones naturales donde la capa freática aflora de manera permanente o estacional.



Ríos (5.1.1): Un río es una corriente natural de agua que fluye con continuidad, posee un caudal considerable y desemboca en el mar, en un lago o en otro río. Se considera como unidad mínima cartografiable aquellos ríos que presenten un ancho del cauce mayor o igual a 50 metros.



Después de realizada la foteointerpretación y digitalización de las coberturas del PNN La Paya, se deduce que el 95,93% del parque natural tiene cobertura de bosques, el 4,07 restante corresponde a clasificaciones como pastos, cultivos y superficies de agua como se presenta en la tabla No. 6:

COD	COBERTURA	AREA (Km)	%
2.3.1	Pastos Limpios	30,282	0,68
2.4.4	Mosaico de Pastos con Espacios Naturales	51,724	1,17
2.4.5	Mosaico de Cultivos, Pastos y Espacios Naturales	6,359	0,14
3.1.1.1.1	Bosque Denso Alto de Tierra Firme	3918,275	88,56
3.1.1.1.2	Bosque Denso Alto Inundable	270,310	6,11
3.1.3.1	Bosque Fragmentado con Pastos y Cultivos	25,396	0,57
3.1.3.2	Bosque Fragmentado con Vegetacion Secundaria	30,319	0,69
3.2.1.1.2	Herbazal Denso Inundable	28,127	0,64
3.2.3	Vegetacion Secundaria o en Transicion	37,366	0,84
3.3.1	Zonas Arenosas Naturales	8,270	0,19
4.1.1	Zonas Pantanosas	8,525	0,19
5.1.1	Rios	9,455	0,21
AREA TOTAL DEL PNN LA PAYA		4424,41	100

Tabla No. 6: Cobertura Vegetal del PNN La Paya.

En el anexo No. 1, se encuentra el mapa final de la cobertura vegetal, para el Parque Natural Nacional La Paya.

El área de cobertura arbórea, dentro del parque Nacional Natural La Paya corresponde al 95,93%, conformado por las cuatro clasificaciones de bosques y áreas seminaturales de Bosque Denso Alto de Tierra Firme, Bosque Denso Alto Inundable, Bosque Fragmentado con Pastos y Cultivos, y Bosque Fragmentado con Vegetación Secundaria

2.4 *Calculo de Índice de Vegetación de diferencias normalizado (NDVI)*

A partir de la imagen Landsat 8 corregida radiométricamente, se calcula el índice de vegetación de diferencias normalizado (NDVI), a partir de las bandas 4 y 5 correspondientes al rojo (0.64-0.67 μm) y al infrarrojo cercano (0.85-0.88 μm). Después de realizado el procedimiento anteriormente descrito, se muestra en la figura No. 3, el resultado final de aplicar el Índice de Vegetación de diferencias normalizado en el zona de estudio, un aspecto interesante de este índice, es que toma valores entre -1 y 1, lo cual facilita notablemente su interpretación, de ellos sólo los valores positivos corresponden a zonas de vegetación, los valores negativos generados por una mayor reflectancia en el visible que en el infrarrojo, pertenecen a nubes, nieve, agua, zonas de suelo desnudo y rocas.

Una vez obtenida la imagen del índice de vegetación, se procedió a extraer las estadísticas individuales para cada cobertura. Para este fin, se realizó una superposición de la capa vector de la cobertura vegetal del PNN La Paya para conocer los niveles digitales del índice de vegetación de diferencias normalizado para cada clasificación dentro de la zona de estudio.

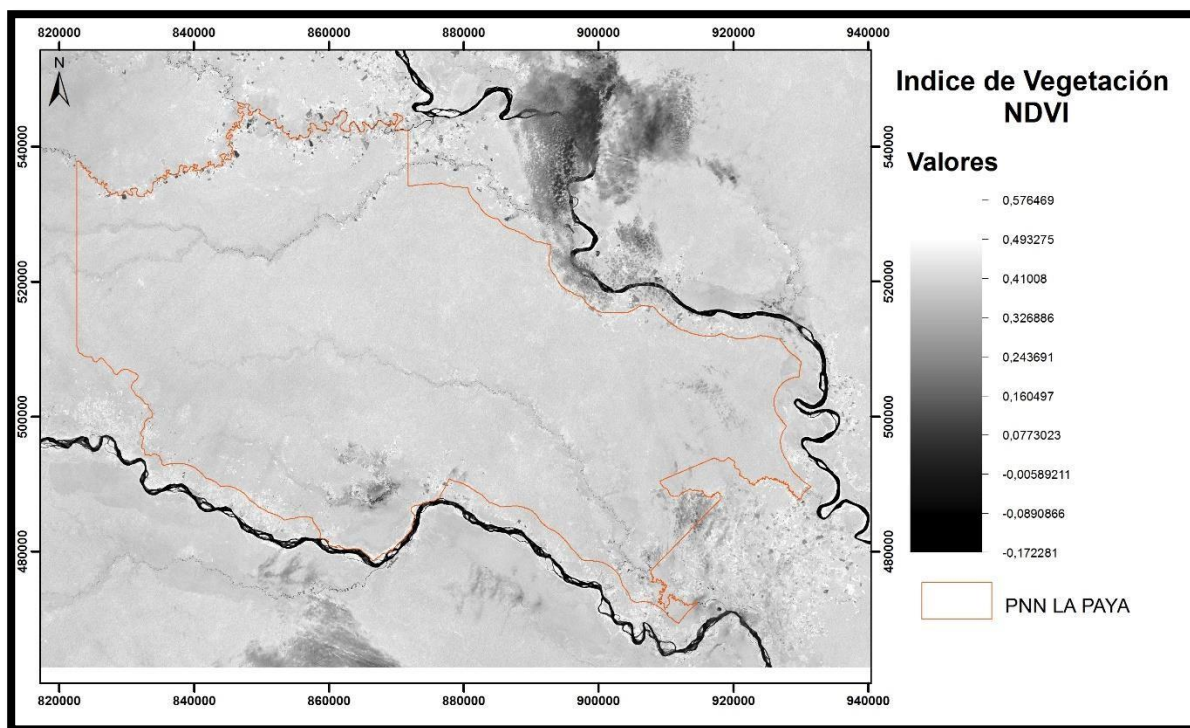


Figura No.3: Índice de vegetación para el PNN La Paya.

2.5 **Calculo de Biomasa arbórea**

El contenido de biomasa por tipo de coberturas arbóreas encontradas dentro de la zona, fue obtenida mediante el modelamiento de variables biofísicas obtenidas de inventarios forestales, generando una ecuación de regresión que expresa la variabilidad de la biomasa respecto a las condiciones biofísicas de un sitio. Los índices de vegetación en relación con los valores de biomasa de biomasa, permitió generar un modelo exponencial de regresión entre los factores dependiente e independiente.

$$Y = a_0[\exp(bx)] \quad \text{Ecuacion No. 4 : Modelo Exponencial de Regresión}$$

En donde:

a_0 y b = son constantes

x = Corresponde a los Niveles Digitales del NDVI (variable independiente)

Y = Corresponde a la biomasa (variable dependiente)

Teniendo las variables independientes (NDVI) y mediante el uso de la biomasa obtenida a partir de los datos de inventarios forestales del acopio de inventarios y cálculos de biomasa, IDEAM 2001, encontrados en Tabla No. 7, se calibró el modelo para encontrar los valores de las constantes, obteniendo la siguiente ecuación de regresión exponencial para estimar el valor de la biomasa arbórea dentro del PNN La Paya.

$$Y = 0.2026[\exp((12.444)*x)]$$
 Ecuacion No. 5: Ecuacion de Regresión Exponencial

COD	COBERTURA	X= NIVELES DIGITALES DE NDVI	Y= BIOMASA (T/Ha.) INVENTARIO FORESTAL
3.1.1.1.1	Bosque Denso Alto de Tierra Firme	0,5	90,9
3.1.1.1.2	Bosque Denso Alto Inundable	0,47	80,2
3.1.3.1	Bosque Fragmentado con Pastos y Cultivos	0,42	32,5
3.1.3.2	Bosque Fragmentado con Vegetacion Secundaria	0,44	55,2
TOTAL		1,83	258,8

Tabla No. 7: Valores de la variable dependiente y la variable independiente, para realizar el modelo de regresión.

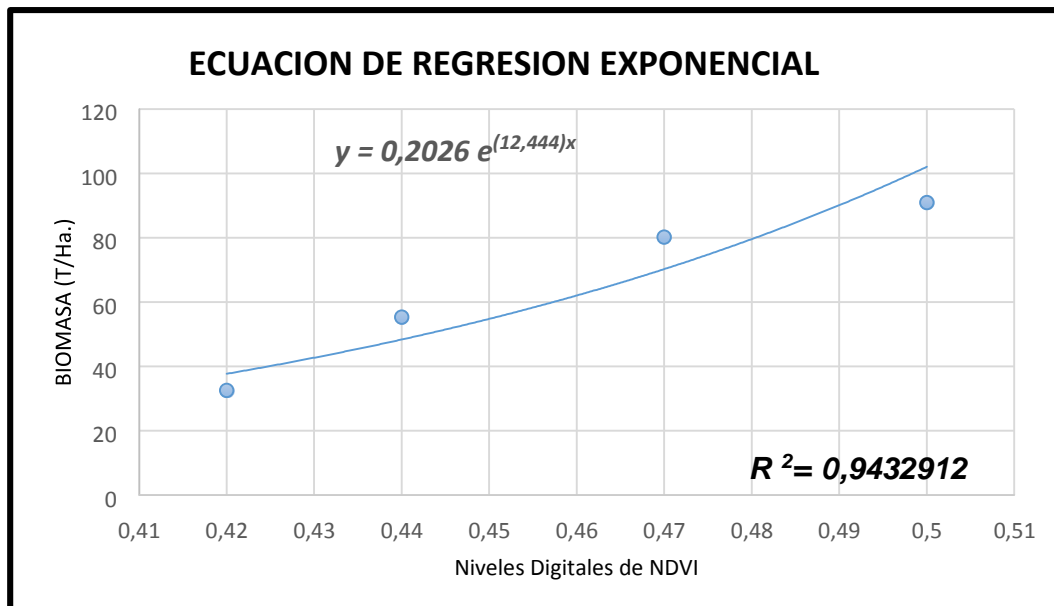


Figura No.4: Grafica, Ecuacion de Regresión Exponencial para Biomasa Arbórea

Con la ecuación No.5, aplicando la formula del modelo exponencial para cada NDVI se procedió a estimar los contenidos de biomasa arbórea por tipo de cobertura vegetal. El procedimiento anteriormente explicado, se basó en la metodología desarrollada por Inversón y S. Brown (1994), la cual propone analizar lo cambios de cobertura y biomasa mediante el monitoreo multitemporal de imágenes de satélite y el uso de datos de inventarios forestales. La suma de todos los valores de biomasa dados en toneladas por hectárea, multiplicado por el área de estudio, proporcionó la estimación de biomasa arbórea para el PNN La Paya.

COD	COBERTURA	AREA (Ha.)	Y= BIOMASA (T/Ha.)
3.1.1.1.1	Bosque Denso Alto de Tierra Firme	391827,518	102,0544553
3.1.1.1.2	Bosque Denso Alto Inundable	27030,954	70,25812949
3.1.3.1	Bosque Fragmentado con Pastos y Cultivos	2539,627	37,71125108
3.1.3.2	Bosque Fragmentado con Vegetacion Secundaria	3031,925	48,36834166
TOTAL		424430,024	258,392
TOTAL BIOMASA ARBOREA DENTRO DEL PNN LA PAYA (En Toneladas)		109669322,8	

Tabla No. 8: Valores de biomasa del modelo de regresión.

Una vez determinado, el modelo de regresión se introduce en el software ERDAS para realizar la estimación de biomasa a través de la imagen de los índices de vegetación, como se observa en la Figura No. 6:

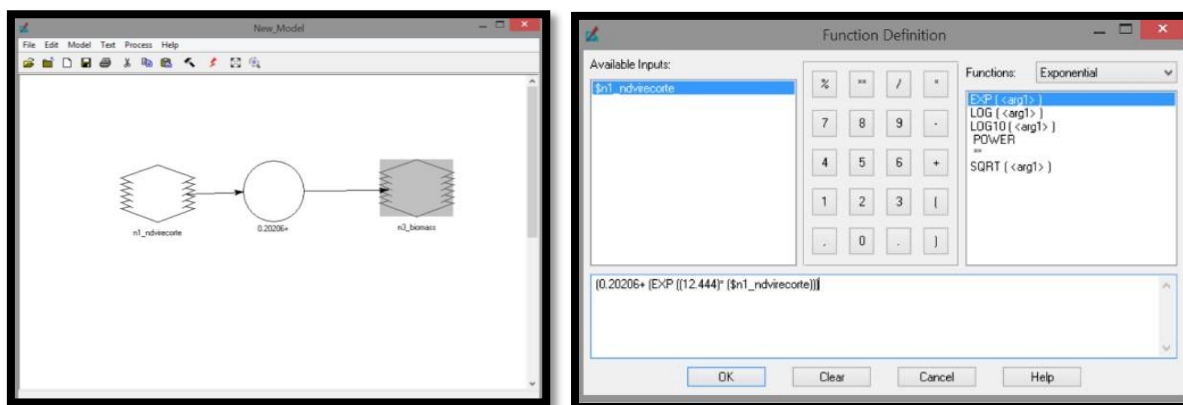


Figura No.5: Modelo en el Software ERDAS, para la estimación de la biomasa arbórea.

De la correlación entre los Niveles Digitales del índice de vegetación NDVI y la biomasa de los inventarios forestales de cada una de las clasificaciones el modelo de regresión presento un valor de $R^2 = 0,9432912$, es decir que el modelo de regresión escogido para este estudio, muestra un valor de ajuste estadísticamente aceptable.

El NDVI es una medida influida por la reflectancia de los pixeles de alrededor, no siendo éste un valor homogéneo. Sin embargo, el NDVI minimiza el efecto del ángulo solar, lo cual hace que sea deseable para una gran variedad de análisis de vegetación, además, los procesos de corrección radiométrica aplicados a la imagen hacen que los valores digitales de la imagen del índice de vegetación se asemeje más a la reflectancia de la superficie de la zona de estudio, dando resultados óptimos dentro del estudio. El área total del Parque Nacional Natural La Paya, es de 442.441 Ha, de las cuales, el 95.93% corresponden a clasificación vegetal arbustiva, solo para estas coberturas, se estimó la cantidad de biomasa en este trabajo. En el estudio hecho por Corredor (2011), para

estimar la cantidad de biomasa dentro del Parque, se concluye que es de 115.309.758,9 T/Ha, este valor resultante, se puede adquirir la biomasa únicamente para las clases correspondientes a coberturas arbustivas la cual es igual 110.616.650,8 T/Ha. La biomasa estimada por medio de índices de vegetación es igual a 109.669.398, como se muestra en la tabla No.8, es decir, que existe una diferencia de 947.252,75T/Ha entre el resultado del estudio anterior y el resultado obtenido de biomasa por índices de vegetación, que corresponde solamente al 0.821% de la totalidad de biomasa del estimada dentro del PNN La Paya, por lo que deducimos que el valor estimado por medio de índices diferenciados de vegetación (NDVI) a través del modelo de regresión exponencial es un resultado óptimo y aceptable.

Este método estuvo influido por los siguientes factores la relación entre biomasa total de los inventarios forestales, área foliar total y altura del dosel; la reflectancia diferencial entre las distintas coberturas estudiadas, fecha de adquisición de la imagen; el efecto de sombra debido a la exposición y a la pendiente de las clasificaciones en relación con la hora de toma de la imagen

En el anexo No. 2, se encuentra el mapa final de la estimación de biomasa calculada por medio de los índices de vegetación NDVI, para el Parque Natural Nacional La Paya.

3 CONCLUSIONES

De este estudio se concluye que es posible estimar razonablemente la biomasa de coberturas de vegetación arbolada con el uso de índices diferenciados de vegetación, para el Parque Nacional Natural La Paya, con los resultados obtenidos, se ha demostrado el potencial de las imágenes de satélite Landsat 8 y el índice diferenciado de vegetación (NVDI) para la gestión ambiental del sistema de Parque Nacional Naturales.

El método estadístico utilizado, la regresión exponencial, se ha mostrado como una técnica adecuada para detectar las zonas donde existe una alta probabilidad de encontrar mayor cantidad de biomasa arbórea a partir de la utilización de variables fáciles de obtener mediante la utilización de técnicas de teledetección, como lo es el uso de índices diferenciados de vegetación.

El uso de técnicas de percepción remota o teledetección para estimar la biomasa arbórea, disminuye significativamente los costos, tanto en tiempo como en dinero y no tiene implicaciones directas y destructivas contra el ecosistema. Sin embargo, no implica el abandonar la verificación de campo; lo recomendable sería tratar de combinar ambos y así optimizar los estudios de NDVI relacionados con biomasa, el cual es un parámetro física importante que sirve para comparar las características estructurales y funcionales de un ecosistema.

En base a los resultados, el proyecto expuesto servirá como base para diferentes estudios más puntuales y específicos que ayuden a determinar la biomasa a través de la percepción remota, habría que aplicar la misma metodología en otras regiones con características similares y diferentes a la zona en estudio, para validar la estimación de biomasa a través de modelos matemáticos, y estar en capacidad de realizar cálculos de biomasa de los otros sistemas de parques nacionales naturales. A través del uso de sensores remotos se podrían predecir cambios de biomasa arbórea en escalas temporales y espaciales

REFERENCIAS

- [1] Alegre J., Ricse A., Arévalo L., Barbarán J. & Palm C. (2000). Reservas de carbono en diferentes sistemas de uso de la tierra en la Amazonía peruana. Consorcio para el Desarrollo Sostenible de Ucayali (CODESU) Boletín informativo.12
- [2] Álvarez et al., (2010). Tree allometric biomass equations along a complex environmental gradient in tropical forests of Colombia: a test to pantropical models. [3] Anaya et al. (2008). Estimación de biomasa aérea en Colombia a partir de imágenes MODIS.
- [4] Bannari .A, Morin .D Bonn F. (1995) A review of Vegetation índices. Remote sensing reviews.
- [5] Brown & Iversón (1994). Land use and biomass changes of forest in peninsular Malasya during1972-82 use of GIS analysis.
- [6] Calderón .J. et al. (1999). Evaluación de dos métodos para la estimación de biomasa arbórea a través de datos LANDSAT TM en Jusnajib La Laguna, Chiapas, México: estudio de caso.
- [7] Cardona Et Al, (2001). Metodología para estimar cambios en biomasa área boscosa y su relación con la emisión y captura de dióxido de carbono usando SIG: estudio de caso bosques de la ecorregión de la serranía de San Lucas.
- [8] Cohen, et al. (2003). An improved strategy for regression of biophysical variables and LANDSAT ETM+ data. Rem. Sens. Environ
- [9] Corredor (2011), Contenido de biomasa y carbono potencialmente almacenado en los bosques del sistema de parques nacionales naturales de Colombia.
- [10] Cortina, G. 1997. Caracterización ecosistémica regional Amazonia ECOFONDO.
- [11] Chuvieco. E.1990. Fundamentos de teledetección espacial.
- [12] Erdas Imagine. (2006). Field Guide.
- [13] Gasparri N, Et al (2007). Utilidad de imágenes LANDSAT 7 ETM+ de diferentes fechas para la estimación de biomasa aérea en bosques subtropicales secos de Argentina.
- [14] Gilabert. M, Et al (1997). Acerca de los Índices de Vegetación. Revista de Teledetección.
- [15] IDEAM, SINCHI, IAvH, INVEMAR. (2001). Perfil ambiental de la Amazonía Colombiana, En: Perfil del estado de los recursos naturales y medio ambiente en Colombia.
- [16] IDEAM, (2009) Análisis y estimaciones de Carbono-Tier 1. Informe de resultados.

- [17] IDEAM, (2010). Estimación de las reservas potenciales de carbono almacenadas en la biomasa aérea en bosques naturales de Colombia
- [18] PARQUES NACIONALES NATURALES. (2010). Plan de Manejo del Parque Nacional Natural La Paya.
- [19] SEVILLANO. E, (2009). Estimación de biomasa en *pinus radiata* (d. don) a partir de índices derivados de imágenes CCD-CBERS.